牛油果果实发育过程中营养物质含量变化研究

唐妮[1,2]，朱宏涛[1]，李雅芝[3]，相罕章[3]，李娜[1]，王东[1]，张颖君[1*]

（1. 中国科学院昆明植物研究所 植物化学与西部植物资源持续利用国家重点实验室，昆明 650201；2. 中国科学院大学，北京 100049；3. 孟连县经济作物工作站，云南 孟连 665899）

摘要：为了确定牛油果的最佳采收期，该文采用电感耦合等离子体发射光谱法、灼烧法、茚三酮柱后衍生离子交换色谱法、回流提取法和 GC-MS 联用技术，研究了‘HASS’、‘V3’和‘V4’等 3 个品种牛油果果实中粗脂肪、氨基酸、矿质元素以及灰分在 6—12 月间的含量变化，以阐明牛油果生长发育过程中营养物质的累积变化规律。结果表明：（1）3 个品种牛油果中油脂的主要成分均为油酸，其中，‘HASS’和‘V4’果实中的粗脂肪含量在 12 月份达到峰值，‘V3’的则在 10 月份即达到峰值，之后有所下降。（2）3 个品种牛油果中均含有 17 种氨基酸，包括 7 种人体必须氨基酸、2 种儿童必须氨基酸以及 8 种人体非必须氨基酸，其中，‘HASS’和‘V3’果实中的 17 种氨基酸含量在 11 月达到峰值，而 V4 的则在 10 月份即达到峰值。（3）3 个品种牛油果中均含有 P、K、Ca、Mg、Zn、Fe、Mn、Cu、Na 等 9 种矿质元素，其中，P、K、Zn、Fe、Na 含量在 10—12 月累积至最大，其余 4 种矿质元素变化规律不明显。（4）灰分含量变化规律与粗脂肪相似。研究表明，3 个品种牛油果的营养物质均在 10 月份即达到最佳值，可根据需求进行采收。

关键词：牛油果，采收期，粗脂肪，氨基酸，矿质元素，灰分

中图分类号：Q946.9　　　　　　　　**文献标识码**：A

Changes of nutrient content during the development of avocado fruit

TANG Ni[1,2], ZHU Hongtao[1], LI Yazhi[3], XIANG Hanzhang[3], LI Na[1], WANG Dong[1], ZHANG Yingjun[1*]

(1. *State Key Laboratory of Phytochemistry and Plant Resources in West China*, *Kunming Institute of Botany*, *Chinese Academy of Sciences*, Kunming 650201, China; 2. *Chinese Academy of Sciences University*, Beijing 100049, China; 3. *Economic Crop Workstation of Menglian County*, Menglian 665899, Yunnan, China)

Abstract: In order to provide a scientific basis for optimum harvest time, the nutrient changes of avocado (*Persea americana*) fruit during the growth and development were studied. An approach of inductively coupled plasma atomic emission spectrometry, ion exchange chromatography derived after ninhydrin column, reflux extraction, burning and GC-MS technique was applied to determine the contents of mineral elements, ash, amino acids, crude fat, and fatty acid composition in three avocado cultivars (‘HASS’, ‘V3’ and ‘V4’), at different growth and development time from June to December. The results were as follows: (1) Oleic acid was the main oil component in the three avocado cultivars. The contents of crude fat in ‘HASS’ and ‘V4’ fruits increased continuously during the growth and development stages, and reached to the maximum on

---

基金项目：云南省普洱市孙汉董院士专家工作站项目[Supported by Expert Workstation Project of Academician Han-Dong Sun in Pu’er City, Yunnan Province, China]。

第一作者：唐妮（1995-），硕士研究生，主要从事药物化学研究，（E-mail）tangni@mail.kib.ac.cn。

*__通信作者__：张颖君，博士，研究员，研究方向为植物资源与化学，（E-mail）zhangyj@mail.kib.ac.cn。

December, while V3 fruit increased continuously from June to October, but decreased in November and December. (2) All fruits of ‘HASS’, ‘V3’ and ‘V4’ contain 17 kinds of amino acids, including 7 essential (THR, MET, VAL, LEU, ILE, PHE, LYS) for human beings, 2 essential (ARG, HIS) for children, and 8 non-essential (PRO, TYR, CYS, ALA, GLY, GLU, SER, ASP) amino acids. The contents of 17 amino acids in ‘HASS’ and ‘V3’ fruits reached to the peak in November, while ‘V4’ fruits reached to the peak in October. (3) All the ‘HASS’, ‘V3’ and ‘V4’ fruits contain 9 mineral elements of P, K, Ca, Mg, Zn, Fe, Mn, Cu and Na. Among which, the contents of P, K, Zn, Fe and Na accumulated to the maximum in the later stages of growth (October to December), while the changes for the other four mineral elements were not obvious. (4) The variation of ash contents in the three cultivars of avocado was similar to that of the crude fat. It suggests that the three studied avocado cultivars, ‘HASS’, ‘V3’ and ‘V4’, have met the picking requirements since October and can be optimized the harvest time following fluctuations in demand.

Key words: avocado, harvest time, crude fat, amino acids, mineral elements, ash

牛油果（*Persea americana*），英文名 avocado，又名鳄梨、樟梨或油梨，为樟科（Lauraceae）鳄梨属（*Persea*）常绿乔木。最早起源于南美洲，现已遍及全球热带和亚热带地区，并以墨西哥、智利、多米尼加共和国、美国南部、哥伦比亚、秘鲁、危地马拉、古巴及印度尼西亚等地栽培为主（Bhuyan et al., 2019）。牛油果果实富含脂肪，并以亚麻酸、油酸等单不饱和脂肪酸为主，此外还含有蛋白质、维生素及各种矿物质。牛油果果实具有健胃清肠、降糖降脂、降血压、抗癌以及保护心血管和肝脏系统等功效（Dreher et al., 2013）。我国自十九世纪初引进，现已在两广、福建、云南、四川和海南等地推广栽培（钱学射等，2011）。

水果中的营养成分含量通常是判断果实生理成熟的标准。例如，猕猴桃的采收标准以果实中可溶性固形物达到 6.2%为最低限度成熟度（李瑞高等，1985）；可溶性固形物和果实硬度为梨的采收指标（崔建潮等，2019）。与猕猴桃、梨等大多数水果不同，牛油果果实在达到最低收获成熟度后，还可以挂在树上长达 12 个月，且刚采摘下的果实并未达到食用要求，需要经过一定时期的后熟过程方能食用（Hurtado-Fernández et al., 2016; 曹森等，2018）。牛油果是否达到采收标准，仅从外观较难判定。采收过早，不仅造成牛油果产量降低、营养欠佳、风味和口感下降，而且容易引起后熟过程延长、后熟不充分甚至引起果实腐烂；采收过晚则不利于储藏及运输，同时对果树营养的耗费增加而不利于果树的生长（陈彦同，2006；袁怀榆等，2020）。因此，确定科学合理的指标以指导牛油果的采收十分重要。

牛油果果实最主要的营养物质为油脂，又以不饱和脂肪酸的含量较高（Donetti & Terry, 2014）。根据品种和生长条件不同，牛油果果实中的含油量在 8%～30%之间，且采收后无明显变化（Lee et al.,1983; Quiñones-Islas et al., 2013）。牛油果中的油脂类成分主要由单不饱和油酸（50%～60%）、饱和棕榈酸（15%～20%）、不饱和棕榈油酸（6%～10%）、多不饱和亚油酸（11%～15%）和亚麻酸（±1%）组成（Donetti & Terry, 2014）。果实中的油含量和成分是衡量牛油果成熟度的重要指标，而不同品种牛油果的最低采收标准有所不同。例如，墨西哥系牛油果以含油量 8%为采收标准，危地马拉系和西印度系牛油果分别以含油量 7.5%～18%和 5%～7%为标准（陈金表，1985）。

除油脂外，牛油果中还富含多种氨基酸及矿质元素，其含量对果实的香气、滋味、口感等品质也具有较大影响（Pedreschi et al., 2019）。因此，除了脂肪含量，氨基酸、矿质元素等营养成分也应作为考量牛油果品质的指标。迄今国内少见这方面的研究报道。

牛油果果实的大小、形状、重量和成分与品种、种植气候高度相关（Rodríguez-López

et al., 2017），孟连县是云南省最主要的牛油果种植地，本研究以产自该地的 3 个牛油果品种，即引进栽培的‘哈斯’（‘HASS’）和自主选育的品种‘V3’和‘V4’，为对象，通过比较分析牛油果生长过程中油脂、氨基酸、矿物质、灰分的含量变化情况，探讨当地不同品种牛油果营养物质的累积规律，为确定牛油果的最佳采收时间提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料和试剂

材料：实验用牛油果‘HASS’、‘V3’和‘V4’均采自云南省孟连县芒信镇海东村海东新寨，海拔 800～1 300 m，生长于喀斯特地貌砖红壤地块的 5 年生盛果期果树。其中，‘HASS’为墨西哥引入品种，‘V3’和‘V4’为普洱绿银生物股份有限公司自主选育品种。选择生长势、干径和负载量相近的植株，按五点取样法在田块中各品种分别选定 10 株果树进行挂牌，并于 2020 年的 6—12 月进行采样，共 7 次，每次间隔 1 个月，每个品种每次采集 10 枚果实。

试剂：硝酸（优级纯）、高氯酸（优级纯）、柠檬酸钠（优级纯）、氢氧化钠（优级纯）、盐酸（浓度≥36%，优级纯）、苯酚（分析纯）购自上海国药集团化学试剂有限公司；氨基酸标准品购自 Sigma 公司；氩气（≥ 99. 995%）、氦气（≥ 99. 995%）购自昆明石头人气体产品有限公司。

仪器与设备：氨基酸分析仪（SYKAM S433D，日本 HITACHI 公司）；等离子体光谱仪（OPTIMA8000，D1-4-3，美国 PerkinElmer 公司）；气相色谱-质谱联用仪（HP6890GC / 5973MS，美国 Agilent Technologies 公司）。

1.2 样品处理和分析方法

1.2.1 粗脂肪含量测定

样品处理：分别把每个待测品种的 10 个单果切碎混匀，准确称取果肉 5 g，置于密闭玻璃容器内，加入适量海砂，置沸水浴上蒸发水分，过滤，干燥，放入索氏提取器筒内加入乙醚进行回流提取，提取完毕后回收提取液，蒸干回收溶剂，干燥后进行称量。

分析方法：参照 GB/T 14772-2008《食品安全国家标准 食品中粗脂肪的测定》计算脂肪含量。

$$X = \frac{m_1 - m_2}{m} \times 100。$$

式中：X 表示脂肪含量（%）；m_2 为底瓶和粗脂肪的质量的数值（g）；m_1 为底瓶的质量的数值（g）；m 为式样的质量的数值（g）。

1.2.2 脂肪酸含量的测定

样品处理：分别把每个待测品种的 10 个单果切碎混匀，准确称取果肉 5 g，将牛油果鲜肉用甲醇浸提，再用正己烷萃取获得牛油果油。牛油果油经皂化再进行 GC-MS 分析。

GC-MS 分析条件：柱温为 50 ℃，以 5 ℃ min^{-1} 升至 150 ℃，保持 3 min，再以 10 ℃ min^{-1} 升至 300 ℃，保持 3 min，进样量为 1 μL，进样口温度 280 ℃，载气为高纯度氦气，载气流速为 1.0 mL min^{-1}。根据峰面积积分以计算相对含量。

1.2.3 氨基酸含量分析

样品处理：分别把每个待测品种的 10 个单果切碎混匀，准确称取果肉 3 g，加入 6 mol L^{-1} 盐酸溶液（10 mL），苯酚 3～4 滴，抽真空，封管，电热鼓风恒温箱（110 ±1）℃内水解 22 h，冷却，过滤至 25 mL 容量瓶内，定容混匀。取 1.00 mL 水解液于（45 ± 5）℃条件下减压干燥，残留物用 2 mL 水溶解。震荡混匀后通过 0.22 μm 滤膜，转移至仪器进样瓶待测。

分析方法：参照 GB 2009. 124-2016《食品安全国家标准 食品中氨基酸的测定》，参数

为钠离子型标准分析柱 4. 6×150 μm；反应柱温为 57. 0 ℃；反应器温度 130 ℃；进样体积 20 μL。氨基酸含量计算公式如下：

$$X = \frac{C\times F\times V\times M}{m\times 10^9}\times 100。$$

式中：X 表示氨基酸含量（g kg^{-1}）；C 为样品液中氨基酸毫克数除以对应氨基酸摩尔质量；F 表示稀释倍数；V 表示定容体积（mL）；M 表示测试样品中各种氨基酸的分子量；m 表示试样称取质量（mg）。

1.2.4 矿质元素含量测定

样品处理：分别把每个待测品种的 10 个单果切碎混匀，精密称取 2.0 g 的混合均匀样品置于聚四氟乙烯消解器皿内，加 10 mL 硝酸-高氯酸（10:1）混合液，于电热板上消解，直至冒白烟，消化液呈无色透明或略带黄色，冷却，用水定容至 25 mL，混匀备用；同时做空白试验。

检测方法：参照 GB 5009.268-2016《食品安全国家标准 食品多元素的测定》中电感耦合等离子体发射光谱法，参数为等离子气流量 15 L min^{-1}；辅助气流量 0.5 L min^{-1}；雾化气气体流量 0.65 L min^{-1}；分析泵速 50 r min^{-1}。

矿质元素含量计算公式如下：

$$X = \frac{(\rho-\rho_0)\times V\times f}{m}。$$

式中：X 表示试样中待测元素含量（mg kg^{-1}）；ρ 表示试样溶液中被测元素的质量浓度（mg L^{-1}）；ρ_0 表示试样空白液中被测元素质量浓度（mg L^{-1}）；V 表示试样消化液定容体积（mL）；f 表示试样稀释倍数；m 表示试样称取质量（g）。

1.2.5 灰分含量测定

样品处理：分别把每个待测品种的 10 个单果切碎混匀，准确称取果肉 3 g，置于沸水浴蒸干，将蒸干后的样品在电热板上以小火加热使试样充分碳化无烟，然后置于高温炉中，在 550 ℃左右灼烧 4 h。冷却至 200 ℃左右，取出，放入干燥器中冷却 30 min，再进行称量。

分析方法：参照 GB 5009.4-2016《食品安全国家标准 食品中灰分的测定》计算灰分含量：

$$X = \frac{m_1-m_2}{(m_3-m_2)\times\omega}\times 100。$$

式中：X 表示灰分含量（%）；m_1 为坩埚和灰分质量的数值（g）；m_2 为坩埚的质量的数值（g）；m_3 为坩埚和试样的质量的数值（g）；ω 为试样干物质含量(质量分数)（%）。

2 结果与分析

对产自云南孟连县的 3 个品种（‘HASS’、‘V3’和‘V4’）牛油果果实在 6—12 月间的粗脂肪、氨基酸、矿质元素和灰分的含量变化，进行了逐月的检测分析和研究。

2.1 果实发育过程中粗脂肪的含量及组成变化

粗脂肪含量是评价牛油果品质和确定其采摘时间的重要指标。从 6 月至 12 月，‘HASS’、 ‘V3’和‘V4’果实中的粗脂肪含量分别为 1.63%～21.72%、1.99%～20.60%和 2.31%～21.82%（鲜重），均发生了显著的变化（图 1）。三个牛油果品种果实中的粗脂肪累积至最高含量时的差异不大，均为 21%左右，但达到最高含量的时间不同，‘V3’果实中的粗脂肪于 10 月份累积至最大，较‘HASS’和‘V4’提早两个月。

其中，‘HASS’的粗脂肪含量呈逐月显著增加趋势，在 6—11 月份增长最快，12 月后有微略增加后达到最大值 21.72%；‘V3’在 6—9 月份增加缓慢，9—10 月份快速增加至最大值，为 20.60%，之后又有所下降； ‘V4’果实中的粗脂肪含量也呈逐月显著增加趋势，至 12 月

份的最大值 21.8%。

三个品种牛油果油中的脂肪酸可分为（1）饱和脂肪酸，主要为硬脂酸（stearic acid）和十四碳酸（tetradecanoic acid）；（2）单不饱和脂肪酸，主要为油酸（oleic acid）和棕榈一烯酸（palmitic monoenoic acid）；（3）多不饱和脂肪酸，主要为亚油酸（linoleic acid）。3 个品种牛油果油中主要脂肪酸含量呈先增加后有所减少又再增加的变化趋势。例如，油酸是牛油果油中含量最高的脂肪酸，‘HASS’和‘V4’的油酸含量均在 7 月份达到峰值，‘V3’在 9 月达到峰值，之后均又逐渐降低，到 12 月份又在次达到第二个峰值。十四碳酸、硬脂酸、棕榈酸、棕榈一烯酸、亚油酸、饱和脂肪酸、单不饱和脂肪酸和多不饱和脂肪酸的含量变化也基本呈相似的变化趋势（表 1）。

表 1 ‘HASS’、‘V3’和‘V4’果实发育过程中油脂中的主要脂肪酸组成及含量变化（单位：%）

Table 1 Changes of fatty acid compositions and contents of oil during the development of ‘HASS’, ‘V3’ and ‘V4’ fruits（Unit: %）

品种 Variety	脂肪酸 Fatty acid	月 Month						
		6	7	8	9	10	11	12
‘HASS’	十四碳酸 Tetradecanoic acid C14:0	0.58	0.35	0.15	0.05	0.03	0.05	0.02
	棕榈酸 Palmitic acid C16:0	13.34	25.37	22.86	17.77	20.55	12.08	17.96
	硬脂酸 Stearic acid C18:0	0.74	0.90	0.54	0.40	0.31	0.20	0.46
	棕榈一烯酸 Palmitic monoenoic acid C16:1	4.52	9.15	10.30	8.54	6.43	6.72	9.88
	油酸 Oleic acid C18:1	30.68	44.94	33.65	31.43	25.01	23.69	31.23
	亚油酸 Linoleic acid C18:2	14.92	10.65	12.74	12.82	13.12	12.55	14.25
	饱和脂肪酸 Saturated fatty acids	14.66	26.62	23.55	18.22	20.89	12.28	18.42
	单不饱和脂肪酸 Monounsaturated fatty acids	35.20	54.09	43.95	39.97	31.44	30.41	41.11
	多不饱和脂肪酸 Polyunsaturated fatty acids	14.92	10.65	12.74	12.82	13.12	12.55	14.25
‘V3’	十四碳酸 Tetradecanoic acid C14:0	1.10	1.80	2.90	0.04	0.10	0.06	0.04
	棕榈酸 Palmitic acid C16:0	12.21	12.77	11.17	16.48	14.20	9.87	16.27
	硬脂酸 Stearic acid C18:0	0.90	0.60	0.53	0.51	0.30	0.24	0.53
	棕榈一烯酸 Palmitic monoenoic acid C16:1	2.59	3.46	5.29	5.11	4.87	3.32	5.16
	油酸 Oleic acid C18:1	12.22	26.29	10.08	37.34	20.77	22.96	28.59
	亚油酸 Linoleic acid C18:2	17.28	19.93	16.32	11.15	7.07	11.85	14.68
	饱和脂肪酸 Saturated fatty acids	14.21	15.17	14.60	17.03	14.60	10.17	16.80
	单不饱和脂肪酸 Monounsaturated fatty acids	14.81	29.75	15.37	42.45	25.64	26.28	33.75
	多不饱和脂肪酸 Polyunsaturated fatty acids	17.28	19.93	16.32	11.15	7.07	11.85	14.68
‘V4’	十四碳酸 Tetradecanoic acid C14:0	0.31	0.21	0.14	0.03	0.08	0.05	0.06
	棕榈酸 Palmitic acid C16:0	6.71	26.37	24.97	16.49	16.41	7.74	18.34
	硬脂酸 Stearic acid C18:0	0.62	1.03	0.78	0.27	0.35	0.20	0.49
	棕榈一烯酸 Palmitic monoenoic acid C16:1	2.83	7.21	7.41	4.96	5.83	2.89	7.30
	油酸 Oleic acid C18:1	7.03	41.26	33.27	33.88	20.86	17.92	34.69
	亚油酸 Linoleic acid C18:2	11.54	12.59	14.68	10.15	9.36	9.31	11.30
	饱和脂肪酸 Saturated fatty acids	7.02	26.58	24.97	16.52	16.49	7.79	18.34
	单不饱和脂肪酸 Monounsaturated fatty acids	9.86	48.47	40.68	38.84	26.69	20.81	41.99
	多不饱和脂肪酸 Polyunsaturated fatty acids	11.54	12.59	14.68	10.15	9.36	9.31	11.30

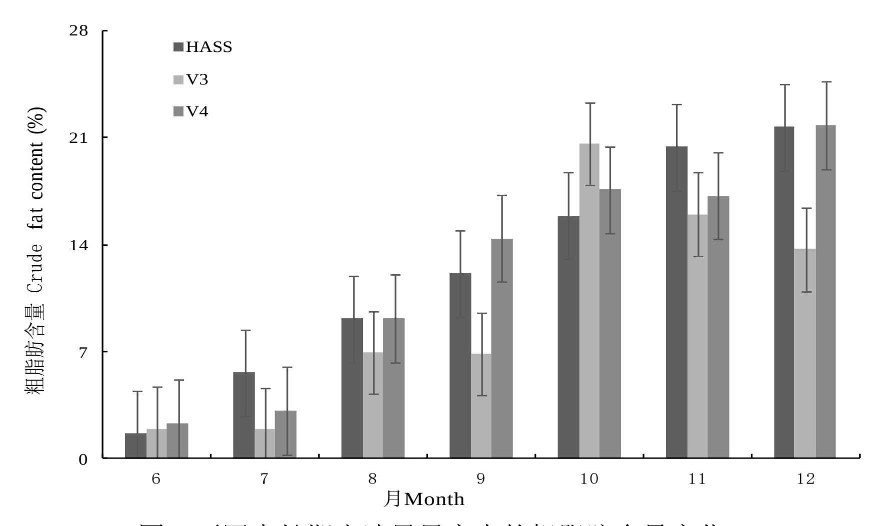


图 1 不同生长期牛油果果实中的粗脂肪含量变化

Fig. 1 Changes of crude fat contents in *Persea americana* fruits at different growing period

2.2 果实发育过程中氨基酸的含量变化

从 3 个牛油果品种中共检测到 17 种氨基酸，包括 7 种人体必需氨基酸（essential amino acid，EAA）：苏氨酸（THR）、蛋氨酸（MET）、缬氨酸（VAL）、亮氨酸（LEU）、异亮氨酸（ILE）、苯丙氨酸（PHE）、赖氨酸（LYS）；2 种儿童必需氨基酸（children essential amino acid，CEAA）：精氨酸（ARG）和组氨酸（HIS）；8 种人体非必需氨基酸（non-essential amino acid，NEAA）：脯氨酸（PRO）、酪氨酸（TYR）、胱氨酸（CYS）、丙氨酸（ALA）、甘氨酸（GLY）、谷氨酸（GLU）、丝氨酸（SER）和天门冬氨酸（ASP）。结果表明，3 个品种牛油果果实中所含氨基酸的种类相同，但含量有所不同。

其中，从 6 月到 12 月，‘HASS’果实中的 EAA、CEAA 以及 NEAA 的含量均先持续增加至 11 月份达到含量最高，而后有所下降。在 7 种 EAA 中，以 LYS 含量最高，LEU 次之，MET 含量最低。除 MET、ARG、CYS、ALA 和 GLU 外，其他 12 种氨基酸的含量至 11 月底时均为最大（表 2）。从 6 月到 12 月，‘V3’果实中 EAA、CEAA 和 NEAA 三类氨基酸在 11 月时均累积至最高。在 7 种 EAA 中，LYS 含量最高，LEU 次之，MET 最低。除 ASP、SER、PRO、MET 和 ILE 外，其他 12 种氨基酸在 11 月时含量均为最大（表 3）。从 6 月到 12 月，‘V4’果实中 EAA、CEAA 和 NEAA 的含量最大值均出现在 10 月份。在 7 种 EAA 中，LEU 含量最高，其次是 LYS，MET 含量最低。除 PRO、ASP 和 CYS 外，其他 14 种氨基酸的含量均在 10 月份时最高（表 4）。

在果实中的氨基酸量累积至最大时，‘HASS’果实中的 EAA、CEAA、NEAA 和总氨基酸（total amino acid, TAA）含量均显著高于‘V3’和‘V4’，后二者中的氨基酸含量差异不大。

2.3 果实发育过程中矿质元素和灰分的含量变化

2.3.1 大量元素的含量变化

从 6 月至 12 月间，大量元素磷（P）、钾（K）、钙（Ca）和镁（Mg）在牛油果果实中的累积，随品种和果实生长发育时期的不同存在较大差异（图 2）。

‘HASS’果实中的 P 含量由 179 mg kg^{-1} 增至 518 mg kg^{-1}（鲜重），期间出现两个迅速增长期。其中，6—7 月间缓慢增长，7—8 月间出现第一个速增期，9—11 月间则为第二个快速增长时期，并于 11 月下旬达到峰值，之后趋于稳定。‘V3’和‘V4’果实中的 P 含量分别为 196～488 mg kg^{-1} 和 181～499 mg kg^{-1}（鲜重），且含量变化趋势相似，即：6—8 月缓慢增长，9—10 月快速增长，并均于 10 月下旬达到最大值，最大值的出现时间较‘HASS’早一个月（图 2：A）。‘V3’和‘V4’果实中的 P 含量在达到最大值时无显著差异，而‘HASS’的则高

于‘V3’和‘V4’。

‘HASS’、‘V3’和‘V4’果实中的 K 含量变化范围分别为 1 113～4 604 mg kg^{-1}、1 448～5 737 mg kg^{-1} 和 1 752～5 496 mg kg^{-1}；也均出现两个明显的快速累积期，其中第一个速增期出现于 7—8 月（图 2：B），而第二个速增期的出现时间及峰值时间则有所不同：‘HASS’和 ‘V4’果实中的 K 含量最大值出现于 10 月下旬，‘V3’的第二个速增期自 9 月一直持续到 11 月底。3 个牛油果品种的果实中 K 含量累积至最大时，‘V3’果实中的 K 含量最高，‘V4’次之，‘HASS’最低。

Ca 含量在‘HASS’、‘V3’和‘V4’果实中的变化范围分别为 88～166 mg kg^{-1}（‘HASS’）、39.7～116 mg kg^{-1}、28.90～128 mg kg^{-1}。3 个品种果实生长期的含量变化趋势相近（图 2：C），6—7 月间，果实中的钙含量迅速增长，并于 7 月下旬出现最大值，此时，‘HASS’果实中 Ca 含量远高于‘V3’和‘V4’，后两者果实中 Ca 含量相差较小；之后 Ca 含量呈下降趋势，并于 9—12 月间趋于平稳。

Mg 含量在 3 个品种间亦有相似的变化趋势，6—7 月间为 Mg 的迅速累积期，7—9 月间略有下降，9—11 月间则表现为缓慢上升趋势。7 月，‘V3’和‘V4’果实中的 Mg 含量均累积至最大，分别为 276 mg kg^{-1} 和 227 mg kg^{-1}，约是 6 月的 2.7 倍和 2.0 倍，10—12 月则有所下降（图 2：D）。‘HASS’果实中的 Mg 含量在 7 月亦处于较高值，约是 6 月的 2.5 倍，至 10—12 月缓慢增加，12 月时含量累积至最大，达 256 mg kg^{-1}，此时‘V3’和‘V4’果实中的 Mg 含量则均有所降低。

2.3.2 微量元素的含量变化

微量元素锌（Zn）、铁（Fe）、锰（Mn）、铜（Cu）、钠（Na）在牛油果果实中的累积，也随品种和果实生长发育时期的不同而存在较大差异（图 3）。

Zn 含量在 6 月至 12 月间总体呈持续增加趋势。其中，‘HASS’果实中的 Zn 含量至 11 月底累积到最高，为 5.85 mg kg^{-1}，之后变化较小；‘V3’果实中的 Zn 含量从 6 月持续增加至 12 月底达到最大，为 5.53 mg kg^{-1}；‘V4’果实中 Zn 含量最高值出现于 10 月底，为 4.05 mg kg^{-1}，11 月和 12 月则有所下降（图 3：A）。Zn 元素积累至最大时，‘HASS’和‘V3’中的 Zn 含量显著高于‘V4’，其中‘HASS’的含量最高。

在 6—12 月的生长期内，3 个牛油果品种的 Fe 含量总体呈增加趋势。其中，‘V4’果实中的 Fe 含量在 10—11 月时处于较高水平，最高值为 11 月的 7.30 mg kg^{-1}（鲜重），12 月则显著降低至 4.85 mg kg^{-1}。‘HASS’和‘V3’果实中的 Fe 含量持续增加至 10 月后趋于平稳。含量达最高值时，‘V4’果实中的 Fe 含量显著高于‘HASS’和‘V3’，此二者果实中的 Fe 含量差异不大（图 3：B）。

Mn 元素含量在牛油果果实生长期内先增加、后下降，再缓慢增加并保持在一定水平上。其中，‘HASS’果实中的 Mn 含量在 6—12 月生长期内始终高于其他两个品种，其在 8 月下旬（11.70 mg kg^{-1}）和 10 月下旬（10.70 mg kg^{-1}）分别出现两个较高的峰值，之后有所下降，11—12 月下旬趋于平稳，保持在 6.63~6.87 mg kg^{-1} 之间。‘V3’和‘V4’果实中的 Mn 含量在 6—12 月整个生长期内基本保持平稳，11—12 月间缓慢增长且‘V3’果实中的 Mn 含量高于 ‘V4’（图 3：C）。

Cu 元素在‘V3’和‘V4’果实中的含量 6 月为最高，此后总体呈下降趋势，至 10 月底降至最低，之后 11—12 月稍有上浮。‘HASS’果实中的 Cu 含量在 6—7 月间有一个缓慢下降，7—11 月间呈持续上升的趋势，至 11 月底达到最大值，12 月则又有所下降。在 9—12 月的生长期内，‘HASS’果实中的 Cu 含量显著高于‘V3’和‘V4’，‘V4’果实中 Cu 含量最低（图 3：D）。

从 6 至 12 月，牛油果果实中的 Na 含量总体呈增加趋势（图 3：E）。其中，‘HASS’和‘V3’果实中 Na 含量从 6 月至 12 月底迅速增加至最大值，分别为 5.21 mg kg^{-1} 和 5.05 mg kg^{-}

^{1}，差异较小。‘V4’果实中 Na 的迅速累积较‘HASS’和‘V3’早一个月，11 月即达到 4.94 mg kg^{-1}的最大值，但略低于‘HASS’和‘V3’果实中 Na 含量的最高值。

2.3.3 灰分的含量变化

灰分，即果实中的无机物总量，也是影响水果品质的重要指标性成分。分析结果表明，灰分在牛油果果实的生长过程中（6—12 月），总体呈增加趋势，含量分别为 0.49%～1.27%（‘HASS’）、0.53%～1.20%（‘V3’）和 0.53%～1.18%（‘V4’），特别是 9—12 月间，增加幅度较大（图 3：F）。

表 2 不同月份采收‘HASS’果实中的氨基酸含量（单位：g kg^{-1}）

Table 2 Contents of amino acids in ‘HASS’ fruit at different harvest months (Unit: g kg^{-1})

氨基酸 Amino acid	月 Month						
	6	7	8	9	10	11	12
ASP△	1.29±0.02b	1.15±0.01c	1.17±0.04c	1.03±0.02d	1.14±0.03e	1.49±0.02a	1.15±0.04c
SER△	0.22±0.02d	0.22±0.03d	0.54±0.04c	0.52±0.02c	0.54±0.03c	0.77±0.01a	0.77±0.03a
GLU△	0.80±0.06e	0.80±0.07e	1.67±0.03c	1.87±0.03b	1.65±0.03c	1.63±0.03c	2.45±0.02a
GLY△	0.44±0.03b	0.80±0.07e	0.54±0.02b	0.52±0.05b	0.51±0.04b	0.72±0.06a	0.75±0.03a
ALA△	0.34±0.04d	0.44±0.04b	0.55±0.03c	0.46±0.05c	0.45±0.04c	0.67±0.06b	0.82±0.03a
CYS△	0.12±0.04c	0.38±0.03b	0.34±0.06d	0.07±0.02cd	0.07±0.02cd	0.11±0.02cd	0.48±0.02a
TYR△	0.16±0.03d	0.27±0.02ab	0.16±0.05c	0.25±0.02c	0.28±0.02ab	0.30±0.02ab	0.33±0.03a
HIS◆	0.31±0.04d	0.31±0.05d	0.35±0.03bc	0.35±0.05bc	0.29±0.05e	0.51±0.03a	0.46±0.02ab
ARG◆	0.32±0.03e	0.37±0.03cd	0.31±0.06d	0.42±0.05cd	0.37±0.04cd	0.45±0.03c	0.57±0.04b
PRO△	0.39±0.3e	0.45±0.38cd	0.39±0.5e	0.54±0.42bc	0.49±0.37cd	0.57±0.48ab	0.66±0.59a
THR*	0.29±0.04f	0.53±0.03b	0.46±0.05bcd	0.41±0.03e	0.42±0.05cd	0.66±0.03a	0.52±0.02bc
MET*	0.03±0.01c	0.09±0.01c	0.08±0.01c	0.08±0.01c	0.08±0.03c	0.15±0.15b	0.19±0.02a
VAL*	0.45±0.03e	0.64±0.03d	0.63±0.05d	0.60±0.02d	0.82±0.04ab	0.90±0.02a	0.78±0.02c
ILE*	0.37±0.04d	0.42±0.03bc	0.51±0.09bc	0.48±0.04bc	0.70±0.04a	0.68±0.03a	0.54±0.02b
LEU*	0.50±0.04d	0.68±0.03c	0.87±0.05b	0.74±0.04c	1.15±0.04a	1.13±0.02a	0.95±0.02b
PHE*	0.30±0.04e	0.46±0.03abc	0.37±0.04cd	0.34±0.04cd	0.43±0.07bc	0.55±0.02ab	0.56±0.02a
LYS*	0.61±0.04e	0.67±0.03de	0.78±0.05c	0.76±0.03cd	1.01±0.04a	1.07±0.02a	0.90±0.02b
EAA	2.55±0.22e	3.48±0.17d	3.69±0.33d	3.41±0.19d	4.61±0.25ab	5.12±0.16a	4.43±0.13c
NEAA	5.96±0.72e	7.66±0.58cde	8.17±0.94bcd	7.01±0.46de	9.42±0.60abc	10.43±0.38a	10.04±0.58ab
CEAA	0.63±0.07c	0.72±0.06c	0.78±0.11bc	0.67±0.09c	0.96±0.05ab	1.02±0.06a	0.98±0.09ab
TAA	8.52±0.93d	11.14±0.75cd	11.87±1.27c	10.42±0.65bc	14.02±0.85ab	15.54±0.54a	14.47±0.69a

注：*表示必需氨基酸；△表示非必需氨基酸；◆表示儿童必需氨基酸； EAA，NEAA，CEAA 分别表示必需氨基酸、非必需氨基酸和儿童必需氨基酸的总含量；TAA 表示总氨基酸。同行不同小写字母表示差异显著（LSD test，$P < 0.05$）。下同。

Note: * indicates essential amino acid; △ indicates non-essential amino acid; ◆indicates children essential amino acid; EAA, NEAA, CE indicate total contents of essential, non-essential and children essential amino acids, respectively; TAA indicates total amino acids. Different small letters in same row indicate significant differences (LSD test , $P < 0.05$). The same below.

表 3 不同月份采收‘V3’果实中氨基酸的含量（单位：g kg^{-1}）

Table 3 Contents of amino acids in ‘V3’ fruit at different harvest months (Unit: g kg^{-1})

氨基酸 Amino acid	月 Month						
	6	7	8	9	10	11	12
ASP△	1.97±0.04b	2.70±0.03a	1.94±0.04b	0.90±0.04f	1.41±0.03e	1.75±0.02b	1.64±0.02c
SER△	0.31±0.04f	0.53±0.03bc	0.39±0.04ef	0.44±0.04cd	0.59±0.03ab	0.53±0.03bc	0.65±0.02a
GLU△	1.18±0.04e	1.64±0.03c	1.61±0.02c	1.45±0.04d	1.88±0.03b	2.06±0.02a	1.57±0.02c
GLY△	0.52±0.04b	0.48±0.03b	0.55±0.04b	0.46±0.04b	0.71±0.03a	0.73±0.03a	0.68±0.02a
ALA△	0.41±0.04d	0.56±0.03c	0.54±0.03c	0.43±0.03d	0.75±0.03b	0.85±0.02a	0.68±0.02b

CYS△	0.15±0.03c	0.34±0.03b	0.12±0.04cd	0.08±0.04cd	0.15±0.03cd	0.05±0.02d	0.50±0.02a
TYR△	0.22±0.04d	0.23±0.03abc	0.22±0.04d	0.23±0.03cd	0.31±0.03a	0.31±0.03ab	0.31±0.02abc
HIS◆	0.37±0.02abc	0.35±0.02cd	0.37±0.03abc	0.30±0.03d	0.42±0.05ab	0.46±0.02a	0.31±0.03d
ARG◆	0.41±0.02b	0.36±0.03b	0.40±0.03b	0.36±0.04b	0.51±0.04a	0.51±0.03a	0.52±0.04a
PRO△	0.46±0.02b	0.52±0.03b	0.47±0.03b	0.40±0.04b	0.28±0.04c	0.45±0.03b	0.61±0.03a
THR*	0.38±0.04b	0.50±0.03a	0.39±0.04b	0.29±0.03c	0.51±0.02a	0.50±0.02a	0.50±0.02a
MET*	0.07±0.05bc	0.06±0.02c	0.06±0.03bc	0.06±0.04bc	0.06±0.05ab	0.06±0.06bc	0.06±0.07a
VAL*	0.53±0.04c	0.57±0.03c	0.60±0.04c	0.55±0.04c	0.70±0.03b	0.87±0.03a	0.75±0.02b
ILE*	0.46±0.04cd	0.40±0.03c	0.48±0.04bcd	0.43±0.04c	0.69±0.03a	0.58±0.03b	0.55±0.02bc
LEU*	0.71±0.04cd	0.64±0.03d	0.78±0.04bc	0.73±0.04cd	1.02±0.03a	0.99±0.02a	0.86±0.02b
PHE*	0.38±0.04b	0.41±0.03b	0.45±0.04a	0.39±0.04b	0.38±0.03b	0.55±0.03a	0.52±0.02a
LYS*	0.75±0.02cd	0.66±0.02d	0.74±0.03cd	0.71±0.04cd	0.89±0.05b	1.02±0.03a	0.82±0.04bc
EAA	3.28±0.23b	3.24±0.19b	3.55±0.26b	3.22±0.24b	4.35±0.23a	4.59±0.18a	4.18±0.17a
NEAA	6.00±0.32c	7.70±0.26a	6.63±0.33bc	5.07±0.36d	7.03±0.35ab	7.67±0.25a	7.46±0.24ab
CEAA	0.78±0.04cd	0.71±0.04bcd	0.78±0.07d	0.67±0.07e	0.93±0.09ab	0.97±0.05a	0.83±0.07bc
TAA	9.28±0.54cd	10.94±0.44ab	10.19±0.59bc	8.29±0.60d	11.38±0.58ab	12.27±0.43a	11.65±0.40ab

表 4 不同月份采收 ‘V4’果实中氨基酸的含量（单位：g kg^{-1}）

Table 4 Contents of amino acids in ‘V4’ fruit at different harvest months (Unit: g kg^{-1})

氨基酸 Amino acid	月 Month						
	6	7	8	9	10	11	12
ASP△	3.81±0.04a	2.70±0.03b	1.01±0.04d	0.99±0.03d	1.46±0.02c	1.38±0.02c	0.77±0.02e
SER△	0.26±0.02d	0.55±0.02ab	0.51±0.02b	0.53±0.03b	0.62±0.04a	0.50±0.02b	0.40±0.02c
GLU△	0.98±0.03f	1.66±0.02d	1.52±0.03e	1.74±0.03c	2.07±0.03a	1.88±0.02b	0.99±0.02f
GLY△	0.46±0.03b	0.48±0.02b	0.48±0.03b	0.48±0.02b	0.69±0.03a	0.66±0.03a	0.45±0.03b
ALA△	0.35±0.02c	0.58±0.02b	0.52±0.03b	0.43±0.03c	0.76±0.03a	0.81±0.02a	0.40±0.04c
CYS△	0.18±0.02b	0.35±0.03a	0.13±0.02bc	0.09±0.02cde	0.12±0.03bcd	0.03±0.01e	0.05±0.01de
TYR△	0.18±0.03bcd	0.24±0.03bc	0.22±0.03bcd	0.17±0.02cd	0.42±0.03a	0.25±0.02b	0.15±0.03d
HIS◆	0.35±0.03b	0.33±0.03b	0.32±0.03bc	0.34±0.03b	0.48±0.04a	0.45±0.02a	0.24±0.02c
ARG◆	0.32±0.03b	0.34±0.05b	0.35±0.03b	0.39±0.02b	0.51±0.02a	0.51±0.03a	0.32±0.04b
PRO△	0.40±0.04c	0.52±0.03ab	0.43±0.03bc	0.50±0.03abc	0.43±0.04bc	0.57±0.04a	0.42±0.03bc
THR*	0.34±0.03b	0.51±0.03a	0.34±0.02b	0.32±0.03b	0.45±0.03a	0.45±0.02a	0.33±0.02b
MET*	0.07±0.02b	0.06±0.02b	0.08±0.02b	0.08±0.01a	0.17±0.03a	0.09±0.01b	0.17±0.02a
VAL*	0.48±0.02d	0.58±0.03c	0.57±0.03c	0.58±0.03c	0.78±0.03a	0.70±0.02b	0.51±0.02cd
ILE*	0.38±0.02cd	0.41±0.03bcd	0.45±0.03bc	0.44±0.02bc	0.65±0.04a	0.49±0.02b	0.33±0.02d
LEU*	0.56±0.03d	0.64±0.04cd	0.73±0.03bc	0.63±0.03d	1.06±0.04a	0.77±0.02b	0.57±0.02d
PHE*	0.31±0.04c	0.42±0.03b	0.31±0.03c	0.29±0.02c	0.67±0.02a	0.42±0.02b	0.29±0.02c
LYS*	0.60±0.03cd	0.65±0.03bcd	0.65±0.03bc	0.73±0.03b	0.91±0.03a	0.86±0.03a	0.56±0.02d
EAA	2.74±0.20c	3.28±0.20bc	3.13±0.20c	3.05±0.17c	4.68±0.21a	3.51±0.29b	2.77±0.15c
NEAA	7.29±0.27a	7.74±0.29a	5.51±0.31b	5.66±0.29b	7.57±0.31a	7.06±0.25a	4.20±0.25c
CEAA	0.68±0.05b	0.67±0.07b	0.68±0.06b	0.73±0.05b	0.99±0.05a	0.96±0.05a	0.56±0.05b
TAA	10.03±0.47b	11.03±0.49ab	8.63±0.50c	8.71±0.46c	12.25±0.52a	10.57±0.24b	6.97±0.40d

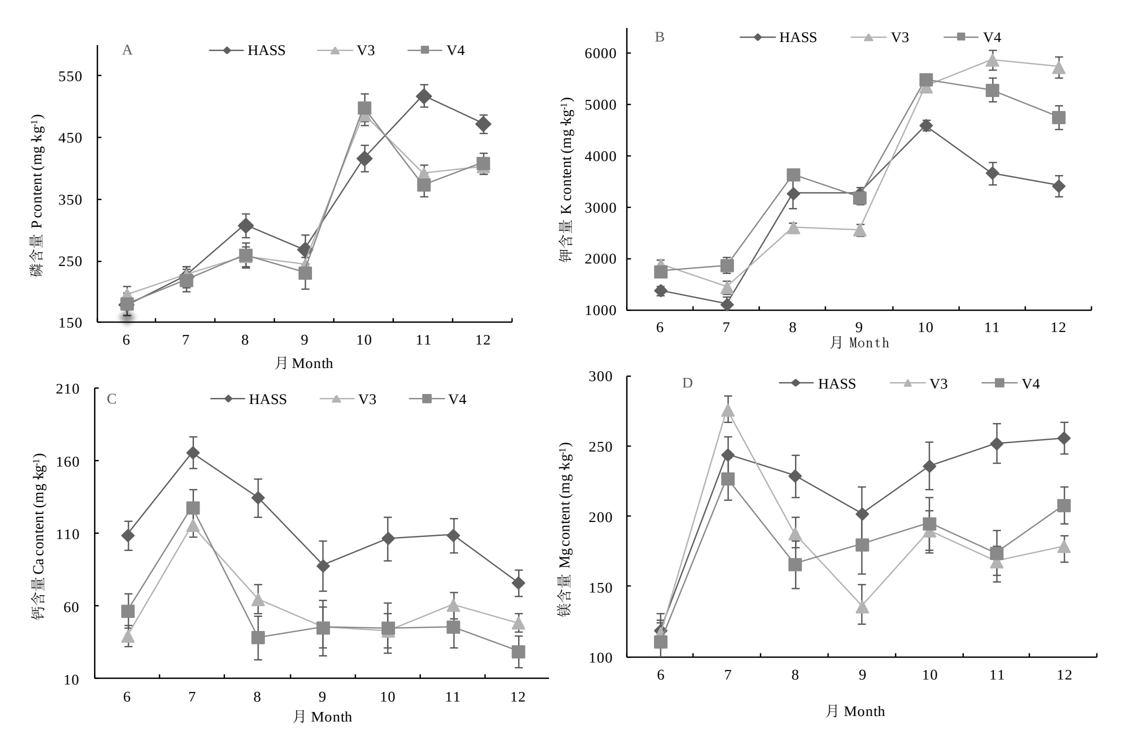


图 2 不同生长期牛油果果实中矿质元素 P（**A**）、K（**B**）、Ca（**C**）和 Mg（**D**）含量

Fig. 2 Contents of P (**A**), K (**B**), Ca (**C**), Mg (**D**) in *Persea americana* fruits at different growing periods

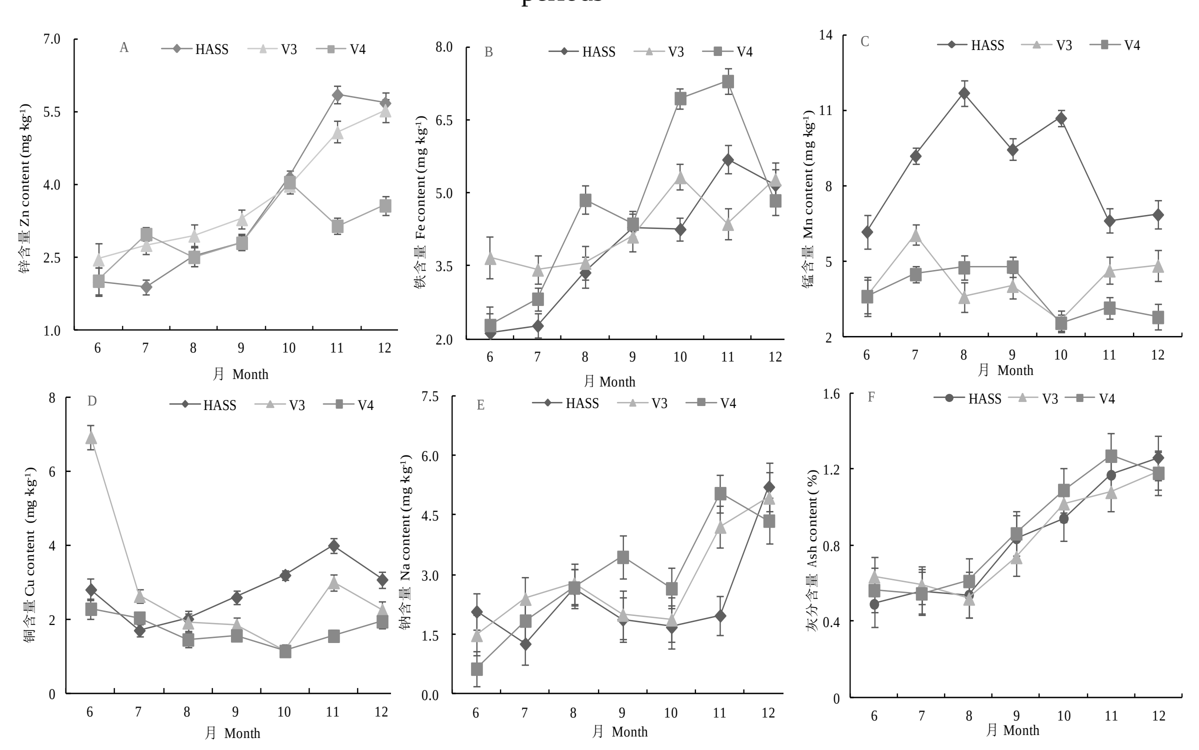


图 3 不同生长期牛油果果实中 Zn（**A**）、Fe（**B**）、Mn（**C**）、Cu（**D**）、Na（**E**）和灰分（**F**）的含量

Fig.3 Contents of Zn (**A**), Fe (**B**), Mn (**C**), Cu (**D**), Na (**E**) and ash (**F**) in *Persea americana* fruits at different growing periods

3 讨论

3.1 油脂含量与果实成熟的关系

与其他水果不同，牛油果生长发育过程中大量累积的是脂肪而不是糖（Ozdemir & Topuz, 2004）。因此，粗脂肪含量是决定牛油果品质的重要因素。据文献报道，晚采收的牛油果果实中的油含量较早采收的含量高（Villa-Rodrǵuez et al., 2011）。例如，从 11 月到次年 1 月，'HASS'果实中的含油量从 14.36%增加到 17.77%，而 Fuete 果实则从 11.02%增加到 19.57%（Ozdemir & Topuz, 2004）。同时，气候、种植地等也会影响牛油果的含油率、不同品种的牛油果中的含油率亦存在差异（Rodriguez et al., 2018）。在本文所研究的 3 个牛油果品种'HASS'、'V3'和'V4'中，脂肪含量在 6—12 月之间存在显著变化，且随采摘时间的后移而增加，与文献的研究结果一致。3 个品种牛油果油中主要脂肪酸为油酸（含量最高）、亚油酸、棕榈酸和棕榈一烯酸，不饱和脂肪酸含量远远高于饱和脂肪酸含量，与王佳雅等人的研究一致（王佳雅等，2018）。

3.2 氨基酸含量与果实成熟的关系

牛油果是水果中蛋白质含量最高的水果（Landahl et al., 2009），蛋白质的优劣由氨基酸的种类和含量所决定(马学艳等，2021)。氨基酸的组成对牛油果的品质和味道有着重要的影响。本研究中，'HASS'、'V3'和'V4'果实中含有 7 种人体必须氨基酸，2 种儿童必须氨基酸和 8 种非必须氨基酸，氨基酸种类较丰富。其中，与鲜味密切相关的氨基酸：天门冬氨酸（ASP）和谷氨酸（GLU）含量远远高于其他氨基酸。'HASS'果实中的总氨基酸含量显著高于'V3'和'V4'，表明不同品种牛油果中的总氨基酸含量存在显著差异。3 个品种中总氨基酸含量随采收时间后移呈 S 形变化趋势，与不同成熟度山楂中氨基酸含量的变化趋势相似（普冰清等，2020）。氨基酸代谢为蛋白质合成、呼吸过程和一系列特殊代谢物提供前体（Zhang et al., 2015）。由此可见，随着牛油果的生长发育，果实中氨基酸在不断的合成和被消耗。

3.3 矿质元素累积与果实成熟的关系

矿质元素可直接影响果实的成熟，其含量对果实采收期的确定具有一定的指导意义。本研究中的 3 个牛油果品种'HASS'、'V3'和'V4'果实中均含有 9 种矿质元素，其中，K 含量最高，其次是 P、Ca、Mg，而 Zn、Fe、Na、Mn 和 Cu 为微量元素。各矿质元素的变化趋势相似，呈先增加后下降再趋于稳定，但含量最大值出现时间不同，该现象与柿子果实在生长过程中的变化趋势类似（Clark et al., 1990），并与植物对矿质元素的吸收、转运，以及不同生长期对营养元素的需求、积累等相关（高启明等，2005）。

K、P、Fe 可调节水果中可溶性固体和次级代谢物的产生，影响水果产量和质量。其中，P 含量的增加能有效促进果实重量的增加。牛油果在后期生长趋于缓慢，P 含量也趋于稳定（Cao et al., 2015）。Ca 对果实品质的形成及采后维持均有重要作用。牛油果中的 Ca 含量在其生长发育期呈先增加后下降的趋势，这与 Ca^{2+}在果实中的吸收、运输和储藏密切相关。一般认为，幼果期 Ca^{2+}的吸收迅速，且果实膨大期所摄入的 Ca 占总 Ca 含量的 90%以上（Tagliavini et al., 2000）。而随着果实的生长，其中不断积累的草酸钙晶体填塞微管组织，阻碍后期 Ca^{2+}的吸收，导致其含量下降（Tuason & Arocena, 2009）。同时，果实中的 Ca 含量还与其中的激素种类和含量相关。例如，随着果实的生长发育，其中促进 Ca^{2+}吸收的吲哚乙酸（IAA）含量降低、而阻碍 Ca^{2+}吸收的脱落酸（ABA）含量增加，导致果实中的 Ca 含量逐渐下降（Tonetto de Freitas et al., 2014）。此外，高含量 Ca 能够保持猕猴桃果实硬度（胥伟秋等，2020），又可通过调节果实可溶性糖、有机酸或其他初级代谢产物含量进一步影响果实的成熟（贾亚男等，2021）。

4 结论

对 3 个牛油果品种（‘HASS’、‘V3’和‘V4’）果实在发育过程中营养成分的含量变化研究表明：（1）其油脂的主要成分均为油酸，从 6 至 12 月，3 个牛油果品种中的粗脂肪含量均持续增加，‘HASS’和‘V4’于 12 月份达到峰值，‘V3’则在 10 月份即达到峰值，之后有所下降；（2）3 个牛油果品种均含有 17 种氨基酸，包括 7 种人体必须氨基酸、2 种儿童必须氨基酸以及 8 种人体非必须氨基酸，其中，‘HASS’和‘V3’中的氨基酸含量于 11 月份达到峰值，而‘V4’则在 10 月份达到峰值；（3）3 个牛油果品种均含有 P、K、Ca、Mg、Zn、Fe、Mn、Cu、Na 等 9 种矿质元素，其中，P、K、Zn、Fe、Na 含量在 10—12 月累积至最大；（4）灰分的含量变化与粗脂肪相似。总之，3 个品种牛油果的营养物质均在 10 月份即达到最佳值。由于牛油果具有在树上不成熟、不掉落的特性，基于不同生长期果实中粗脂肪、氨基酸和矿质元素等营养物质的累积变化规律及含量最大化原则，‘HASS’、‘V3’和‘V4’三个牛油果品种果实自 10 月起即可根据需求进行采摘。有关营养物质在牛油果熟化过程中的变化及其规律，有待进一步研究。

参考文献：

BHUYAN DJ, MA ALSHERBINY, SPERERA et al., 2019. The odyssey of bioactive compounds in avocado (*Persea americana*) and their health benefits[J]. Antioxid, 8(10): 426.

CAO F, GUAN C, DAI H, et al., 2015. Soluble solids content is positively correlated with phosphorus content in ripening strawberry fruits [J]. Sci Hortic, 195: 183-187.

CAO S, MAO C, JI N,et al., 2018. Effects of 1-MCP on preservation and ripening quality of ‘Hongyang’ kiwifruit with different maturity [J]. Food Sci Technol, 43(11): 29-37. [曹森，马超，吉宁，等，2018. 1-MCP 对不同成熟度‘红阳’猕猴桃保鲜效果及后熟品质的影响[J]. 食品科技，43(11): 29-37.]

CHEN JB, 1985. Observation on biological characteristics of avocado fruit[J]. Subtrop Plant Sci, (2): 16-21. [陈金表，1985. 鳄梨果实的生物学特性观察[J].亚热带植物通讯，(2):16-21.]

CHEN YT, 2006. Preliminary study on timely harvest time of red Fuji apple[J]. J Hebei For Sci Technol, (4): 17-18. [陈彦同，2006. 红富士苹果适时采收期初探[J]. 河北林业科技，(4): 17-18.]

CLARK CJ, GSSMITH, 1990. Seasonal changes in the composition, distribution and accumulation of mineral nutrients in persimmon fruit[J]. Sci Hortic, 42(1): 99-111.

CUI JC, PENG RZ, WANG WH, et al., 2019. Effects of harvest period on fruit quality and postharvest physiology of ‘Xinli 7’ pear[J]. Chin Fruits, 195(1): 21-26. [崔建潮，彭增瑞，王文辉，等，2019. 采收期对‘新梨 7 号’梨果实品质及采后生理的影响[J]. 中国果树，195(1): 21-26.]

DONETTI M, TERRY LA, 2014. Biochemical markers defining growing area and ripening stage of imported avocado fruit cv. Hass [J]. J Food Compos Anal, 34(1): 90-98.

DREHER ML, DAVENPORT A, 2013. Hass avocado composition and potential health effects[J]. Crit Rev Food Sci Nutr, 53(7): 738-750.

GAO QM, LI J, ZHANG C, et al., 2005. Variation of several mineral element content in the fruit of mume cultivar Jinguang during the development[J]. J Fruit Sci, (4): 331-334. [高启明，李疆，张传，等，2005. 金光杏梅果实生长发育期间几种矿质元素含量的变化[J]. 果树学报，(4): 331-334.]

HURTADO-FERNÁNDEZ E, GONZÁLEZ-FERNÁNDEZ JJ, HORMAZA JI, et al., 2016.

Targeted LC-MS approach to study the evolution over the harvesting season of six important metabolites in fruits from different avocado cultivars [J]. Food Anal Methods, 9(12): 3479-91.

LANDAHL S, MEYER MD, TERRY LA, 2009. Spatial and temporal analysis of textural and biochemical changes of imported avocado cv. Hass during fruit ripening[J]. J Agric Food Chem, 57(15): 7039-7047.

LEE SK, SCHIFFMAN PM, COGGINS CW, 1983. Maturity studies of avocado fruit based on picking dates and dry-weight [J]. J Am Soc Hortic Sci, 108(3): 390-394.

LI RG, HUANG CG, LIANG MY, et al., 1985. Investigation on Kiwifruit germplasm resources in Guangxi[J]. Guihaia, 5(3): 253-267. [李瑞高，黄陈光，梁木源，等，1985. 广西猕猴桃种质资源调查研究[J]. 广西植物，5(3): 253-267.]

MA XY, SUN G, WANG L, et al., 2021. Nutrients and mineral elements in *Olenaia oleivora* from Huaihe river: seasonal variations[J]. J Agric, 11(10): 90-94. [马学艳，孙光，王林，等，2021. 淮河橄榄蛏蚌营养成分及矿物质元素季节性变化分析[J]. 农学学报，11(10): 90-94.]

OZDEMIR F, TOPUZ A, 2004. Changes in dry matter, oil content and fatty acids composition of avocado during harvesting time and post-harvesting ripening period[J]. Food Chem, 86(1): 79-83.

PEDRESCHI R, UARROTA V, FUENTEALBA C, et al., 2019. Primary metabolism in avocado fruit[J]. Front Plant Sci, 10: 795.

PU BQ, ZHANG XN, LI DX, et al., 2020. Study on the dynamic changes of free amino acids in *Crataegus pinnatifida* during ripening[J]. Guangzhou Chem Ind, 48(10): 105-107. [普冰清，张晓南，李东娴等，2020. 成熟过程中山楂中游离氨基酸动态变化研究[J]. 广州化工，48(10): 105-107.]

RODRIGUEZ P, HENAO JC, CORREA G, et al., 2018. Identification of harvest maturity indicators for ‘Hass’ avocado adaptable to field conditions[J]. Hort Technol, 28(6): 815-821.

RODRÍGUEZ-LÓPEZ CE, HERNANDEZ-BRENES C, TREVINO V, et al., 2017. Avocado fruit maturation and ripening: dynamics of aliphatic acetogenins and lipidomic profiles from mesocarp, idioblasts and seed [J]. BMC Plant Biol, 17(1): 159.

QIAN XS, ZHANG WM, SHI XP, et al., 2011. Types, varieties, suitable areas and cultivation of avocado[J]. Chinese Wild Plant Resour, 30(2): 60-62. [钱学射，张卫明，石雪萍，等，2011. 鳄梨的类型和品种与适宜地区及栽培[J]. 中国野生植物资源，30(2): 60-62.]

QUIÑONES-ISLAS N, GABRIEL, A MEZA-MARQUEZ O, et al., 2013. Detection of adulterants in avocado oil by Mid-FTIR spectroscopy and multivariate analysis [J]. Food Res Int, 51(1): 148-154.

TAGLIAVINI M, ZAVALLONI C, ROMBOL AD, et al., 2000. Mineral nutrient partitioning to fruits of deciduous trees[J]. Acta Hortic, 512: 131-140.

TONETTO DE FREITAS S, McELRONE AJ, SHACKEL KA, et al., 2014. Calcium partitioning and allocation and blossom-end rot development in tomato plants in response to whole-plant and fruit-specific abscisic acid treatments[J]. J Exp Bot, 65(1): 235-247.

TUASON MMS, AROCENA JM, 2009. Calcium oxalate biomineralization by *Piloderma fallax* in response to various levels of calcium and phosphorus[J]. Appl Environ Microbiol, 75(22): 7079-7085.

VILLA-RODRÍGUEZ JA, MOLINA-CORRAL FJ, AYALA-ZAVALA JF, et al., 2011. Effect of maturity stage on the content of fatty acids and antioxidant activity of ‘Hass’ avocado [J]. Food Res Int, 44(5): 1231-1237.

WANG JY, SHANG YE, ZHANG D, et al., 2018. Comparison of qualities of avocado and its oil from different origins and maturities[J]. Chin Oil Fats, 43(2): 94-97. [王佳雅，尚艳娥，张丹等，2018. 不同产地及成熟度牛油果及其油脂品质比较[J]. 中国油脂，43(2): 94-97.]

XU WQ, LIAO HP, LIU Y, et al., 2020. The effects of calcium application on fruit quality and storage property of kiwifruit[J]. Resour Dev Mark, 36(12): 1404-1409. [胥伟秋，廖慧苹，刘瑶，等，2020. 施用钙制剂对猕猴桃果实品质与贮藏性的影响[J]. 资源开发与市场，36(12): 1404-1409.]

ZHANG LZ, GARNEAU MG, MAJUMDAR R, et al, 2015. Improvement of pea biomass and seed productivity by simultaneous increase of phloem and embryo loading with amino acids [J]. Plant J Cell Mol Biol, 81(1): 134-146.